

Tutorial teórico-práctico: medición de magnetismo residual

Laboratorio de Densidad de Flujo Magnético

Centro Nacional de Metrología

M. G. Alatorre Moreno
malatorr@cenam.mx

M. A. Escobar V.
mescobar@cenam.mx



Contenido

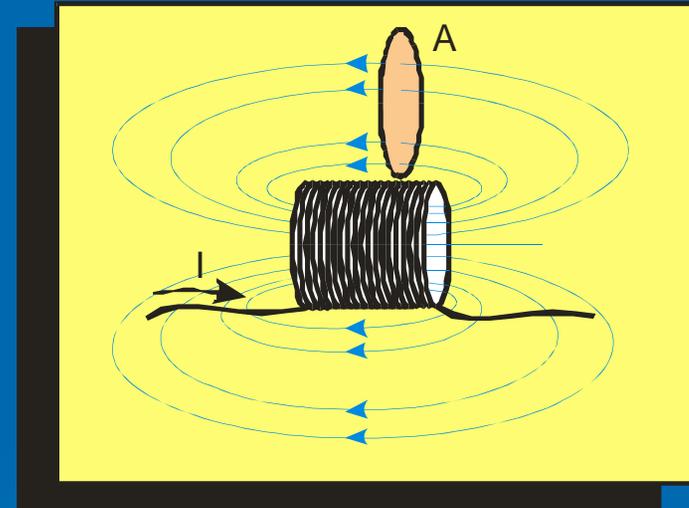
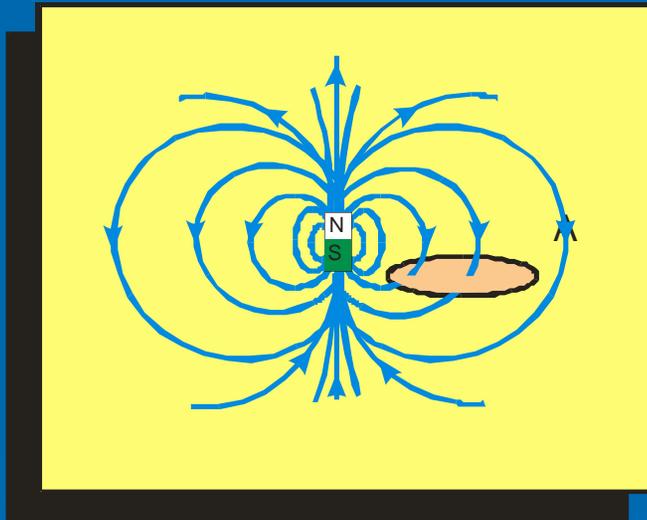
1. Objetivo
 2. Introducción
 3. Fundamentos de Magnetismo
 4. Necesidades metrológicas detectadas
 5. ¿Por qué es importante medir el magnetismo residual?
 6. Consideraciones prácticas en las mediciones de magnetismo residual
 - i. Magnetómetros utilizados, sus especificaciones y principios de medición
 - ii. Método de medición y cuidados que se requieren en la realización de las mediciones.
 7. Prácticas de medición de magnetismo residual y análisis de las mediciones.
 - i. Determinación de las principales fuentes de error y de incertidumbre en las mediciones
 - ii. Trazabilidad de las mediciones
-

1. Objetivo :

Fortalecer las competencias técnicas del personal de la industria que realiza o requiere realizar mediciones de magnetismo residual, para contribuir al aseguramiento de la calidad de sus productos.

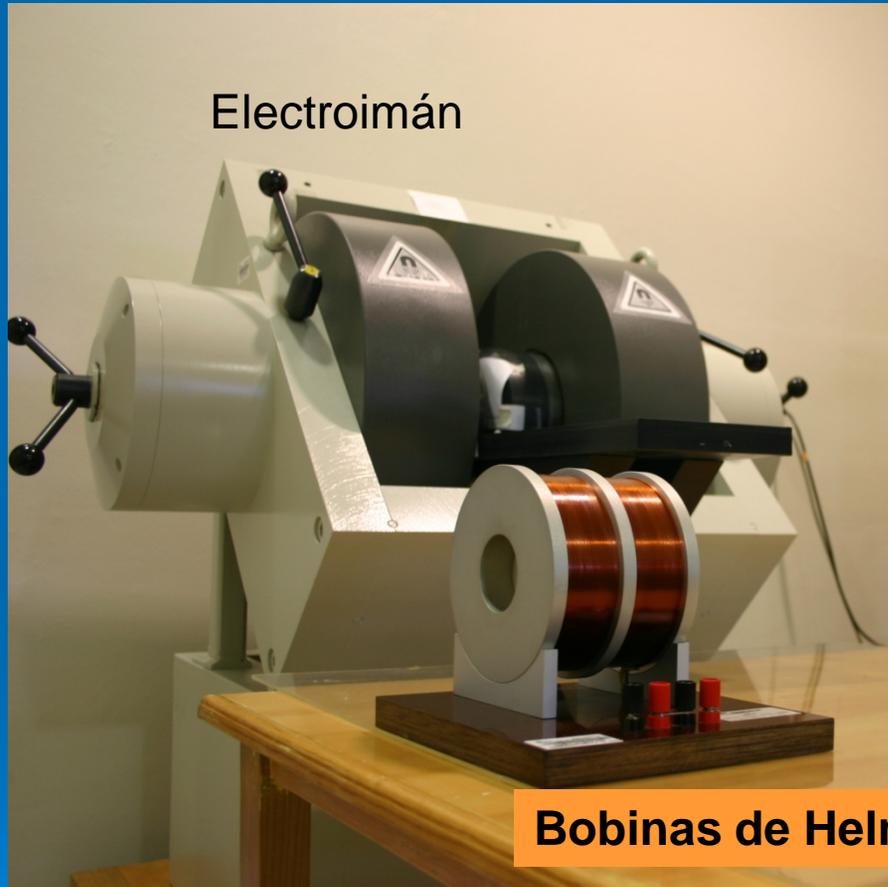
2. Introducción

Densidad de flujo magnético: Flujo magnético o número de líneas de campo magnético por unidad de área, que es generado por corrientes eléctricas que circulan a través de circuitos eléctricos o por imanes

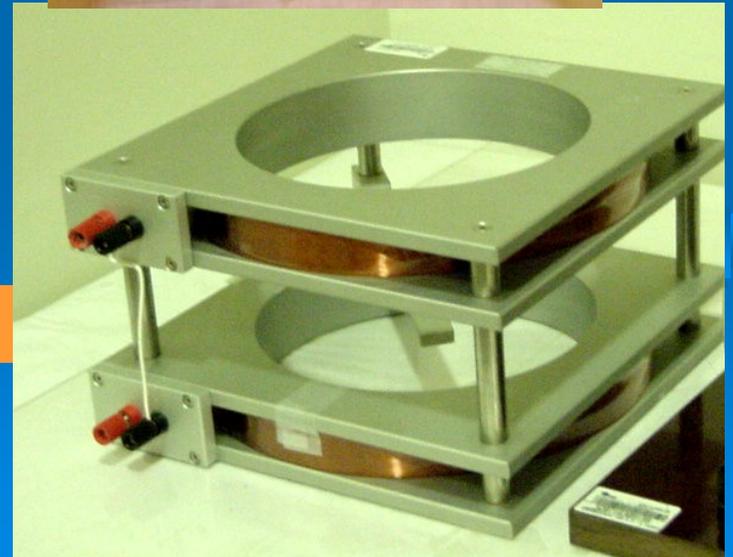
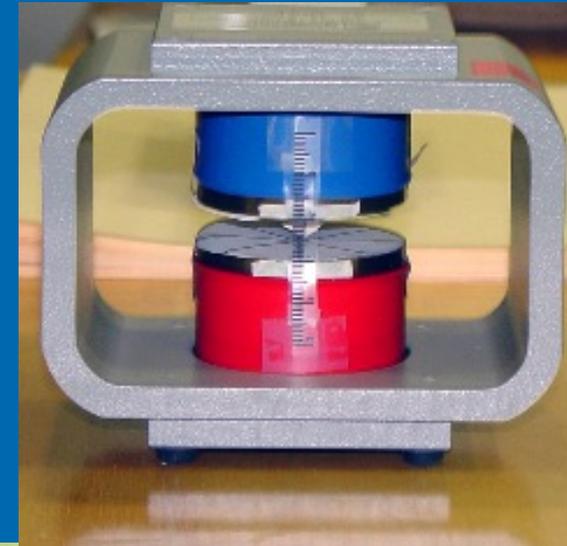


Magnitud	Símbolo	Unidad del Sistema Internacional
Densidad de flujo magnético	B	tesla (T) = Wb/m ²

Sistemas de generación de campo magnético B



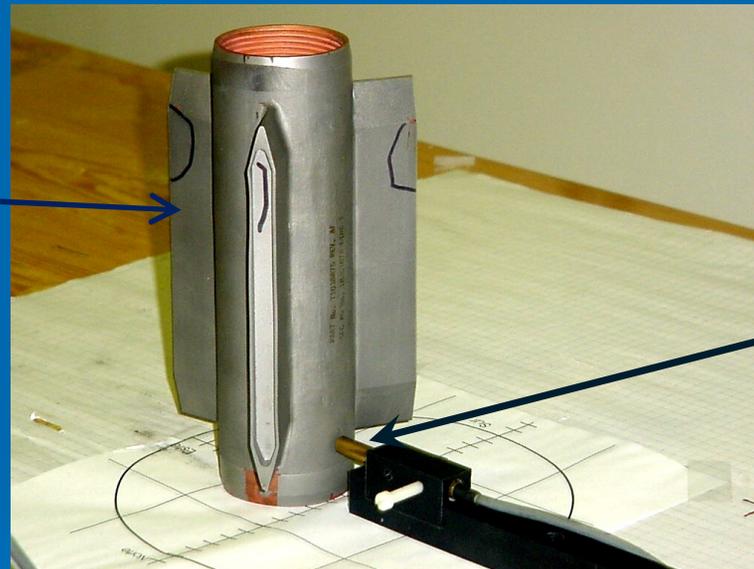
Bobinas de Helmholtz



Magnetismo residual (B residual)

Por magnetismo residual se entiende la densidad de flujo magnético o inductancia magnética o polarización magnética remanente, que persiste en ciertos materiales después de haber desaparecido el campo magnético al que fueron expuestos, éste varía dependiendo del material.

**Centralizador
de acero**



**Sensor de
medición de flujo
axial**

En el caso de los aceros, el valor del magnetismo residual puede ser muy pequeño, del orden de algunos nT a mT.

3. Fundamentos de Magnetismo

- Inducción magnética B en la materia:

Cuando se coloca un material en un campo magnético H , el material bajo prueba puede ser atraído por la región intensa del campo ó bien repelido por éste. Esto significa que en el material se induce un campo magnético B , llamado también inducción magnética o densidad de flujo magnético, el cual interacciona con el campo externo H .

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0\mathbf{H} + \mathbf{J}$$

donde:

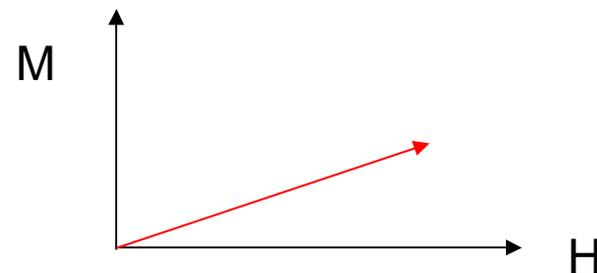
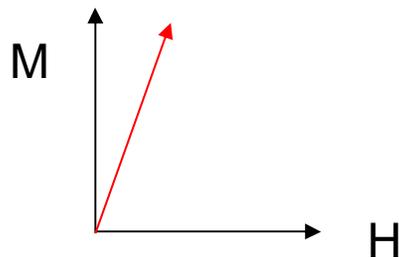
- B = densidad de flujo magnético, en tesla T (Wb/m^2),
- $\mu_0 \equiv$ cte. magnética = $4\pi \times 10^{-7}$, en Wb/Am
- M = magnetización inducida, en A/m
- J = polarización magnética inducida, en tesla T
- H = intensidad del campo magnético externo, en A/m .

- Susceptibilidad magnética χ :

Es una propiedad característica de los materiales, la cual podemos definir como la razón entre la magnetización inducida en el material, o polarización magnética, y la intensidad del campo magnético H , al cual está sujeto dicho material. Puede interpretarse como una medida de la facilidad que presenta un material para ser magnetizado por un campo magnético externo H :

$$M = \chi H \quad \rightarrow \quad \text{Susceptibilidad relativa } \chi = M / H$$

$$J = \chi H \quad \rightarrow \quad \text{Susceptibilidad absoluta } \chi = J / H \text{ (en Wb/Am)}$$



- Permeabilidad magnética μ :

Se puede definir como la relación entre el campo de inducción magnética B y la intensidad de campo magnético H :

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H}$$
$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad [\text{en tesla, T}]$$

donde:

$\mu = \mu_0(1 + \chi) \equiv$ *permeabilidad magnética absoluta* [en Wb/Am], y

$\mu/\mu_0 = (1 + \chi) = \mu_r \equiv$ *permeabilidad magnética relativa* [sin dimensiones]

- Clasificación Magnética de materiales:

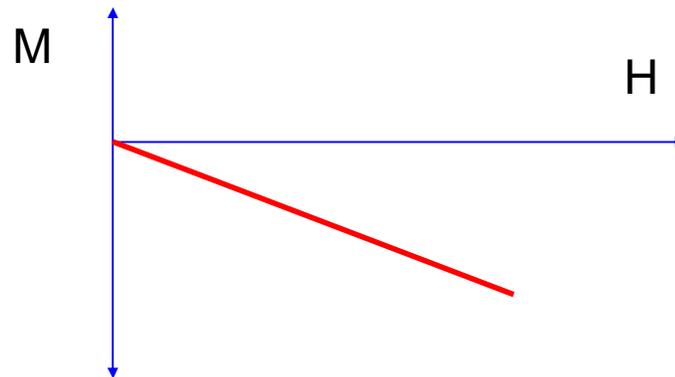
Los materiales pueden clasificarse magnéticamente, según el valor de su susceptibilidad magnética ($\chi = \mathbf{M} / \mathbf{H}$), en tres grupos principales:

- Materiales Diamagnéticos: $\chi < 0$
(Ejemplos: H₂O, Ag, Au, Cu, C, Pb y el petróleo)
- Materiales Paramagnéticos: $\chi > 0$
(Ejemplos: Al, O, K)
- Materiales Ferromagnéticos: $\chi \rightarrow \infty$
(Ejemplos: Fe, Co, Ni)

las propiedades magnéticas de los materiales dependen de su estructura electrónica y de los movimientos propios de los electrones: movimiento orbital y de spin.

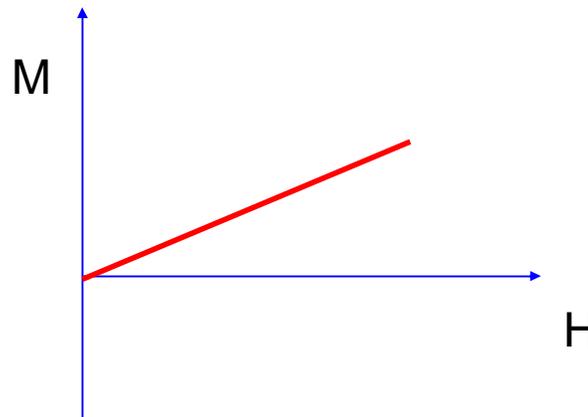
- Materiales Diamagnéticos: $\chi < 0$

Este tipo de materiales se caracteriza por presentar una susceptibilidad negativa. El diamagnetismo es debido al movimiento orbital de los electrones. Bajo la acción de un campo magnético externo \mathbf{H} , se induce en el material un cambio en el movimiento orbital de sus electrones, de tal manera que los momentos magnéticos asociados a las corrientes así inducidas, producen una magnetización $\neq 0$, muy pequeña.

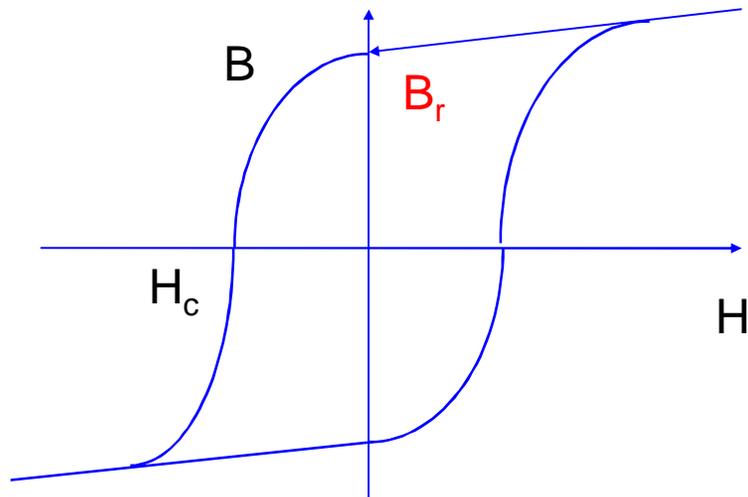


- Materiales Paramagnéticos: $\chi > 0$

Los materiales paramagnéticos se caracterizan por tener una susceptibilidad positiva, relativamente pequeña. Son materiales cuyos átomos presentan dos características esenciales: (1) capas electrónicas parcialmente llenas, y como consecuencia de esto, (2) un momento magnético resultante distinto de cero. Bajo la acción de un campo magnético externo \mathbf{H} , los momentos magnéticos de los átomos tienden a alinearse en la dirección del campo (ver Fig.), resultando así una magnetización $\mathbf{M} \neq 0$.



- Materiales Ferromagnéticos: $\chi \rightarrow \infty$



B_r , inducción magnética remanente o residual, es el valor de B a $H = 0$,

Ejemplos: Fe, Co, Ni y aleaciones con elementos de tierras raras, como el Nd.

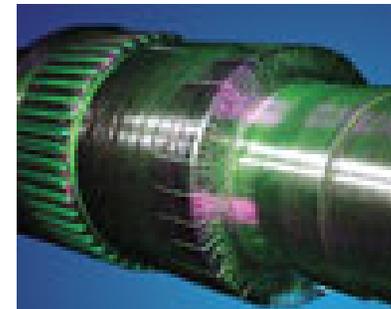
- A nivel microscópico estos materiales presentan una **alineación paralela espontánea**, de sus momentos magnéticos atómicos en ausencia de campo.
- Presentan una curva característica de B en función de H , $B(H)$, llamada *CICLO DE HISTERESIS*, la “huella digital” de los materiales ferromagnéticos.

4. Necesidades metrológicas detectadas:

Necesidad	Industria o Sector
<ul style="list-style-type: none">• Medición de magnetismo residual.• Calibración de magnetómetros, para la medición de magnetismo residual.• Capacitación para realizar buenas prácticas de medición de magnetismo residual	<p>Autopartes Metal-mecánica Aeronáutica</p>

Por ejemplo, en la Industria de Autopartes y Aeronáutica:

Existe la necesidad de medir el magnetismo residual en partes automotrices y trenes de aterrizaje, que han sido sujetas a campos magnéticos, para la detección de fisuras por partículas ferromagnéticas, para el cumplimiento de normas internacionales y el aseguramiento de la calidad de sus productos.



5. ¿Por qué es importante medir el magnetismo residual?

- Para contribuir a asegurar el buen funcionamiento de sistemas electromecánicos, donde partes o piezas de acero son fundamentales.
- Para el control de calidad del proceso de fabricación de piezas de acero.
- Para asegurar la calidad de productos y cumplir con los requerimientos del sistema de calidad, implantados en cada industria.
- Para cumplir con normas nacionales e internacionales y poder vender y exportar productos.

- **Medir bien, para contribuir al aseguramiento de la calidad de los productos, implica:**
 - Tener conocimiento del material, cuya propiedad magnética se quiere medir.
 - Tener conocimiento de la magnitud o propiedad magnética del material, que se quiere medir o determinar su valor.
 - Conocer los factores de influencia que pueden afectar el o los resultados de una medición.
 - Determinar y conocer el equipo más adecuado para realizar las mediciones.
 - Contar con patrones o instrumentos de medición calibrados, para hacer correcciones por el error de medición del instrumento utilizado.
 - Contar con métodos de medición validados.

6. Consideraciones prácticas en las mediciones de magnetismo residual

- i. Magnetómetros utilizados, sus especificaciones y principios de medición.
- ii. Método de medición y cuidados que se requieren en la realización de las mediciones.

Magnetómetros digitales y analógicos usados en las mediciones de magnetismo residual

Analógico



Efecto Hall



Magnetómetro Fluxgate



Magnetómetro analógico

Ventajas

- Repetibilidad
- Rápida respuesta
- Bajo costo
- Fácil de usar
- Fácil de transportar
- Compacto
- No requiere accesorios adicionales

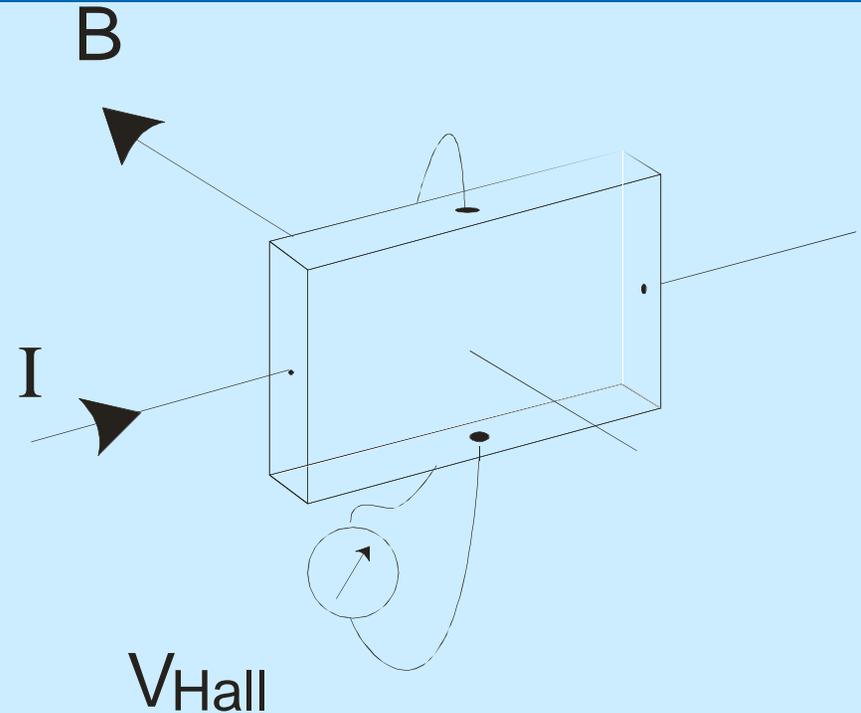
Desventajas

- Baja resolución
- Sensible a impactos
- Período de calibración corto
- Mide sólo campos magnéticos B continuos

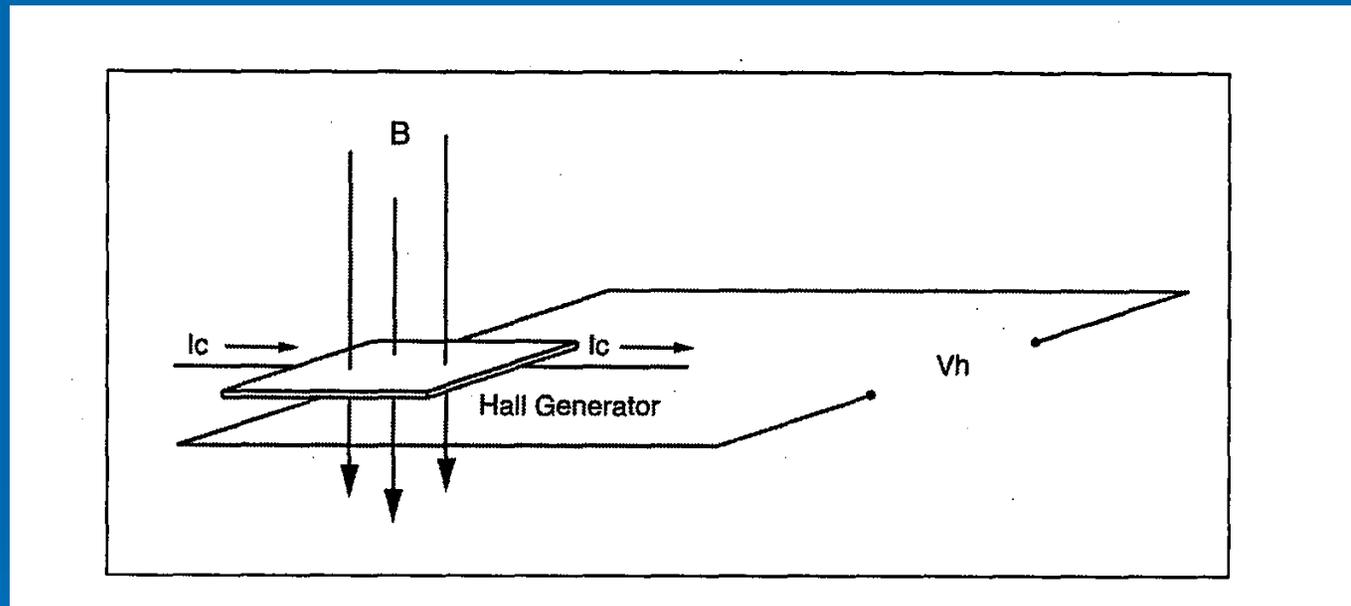




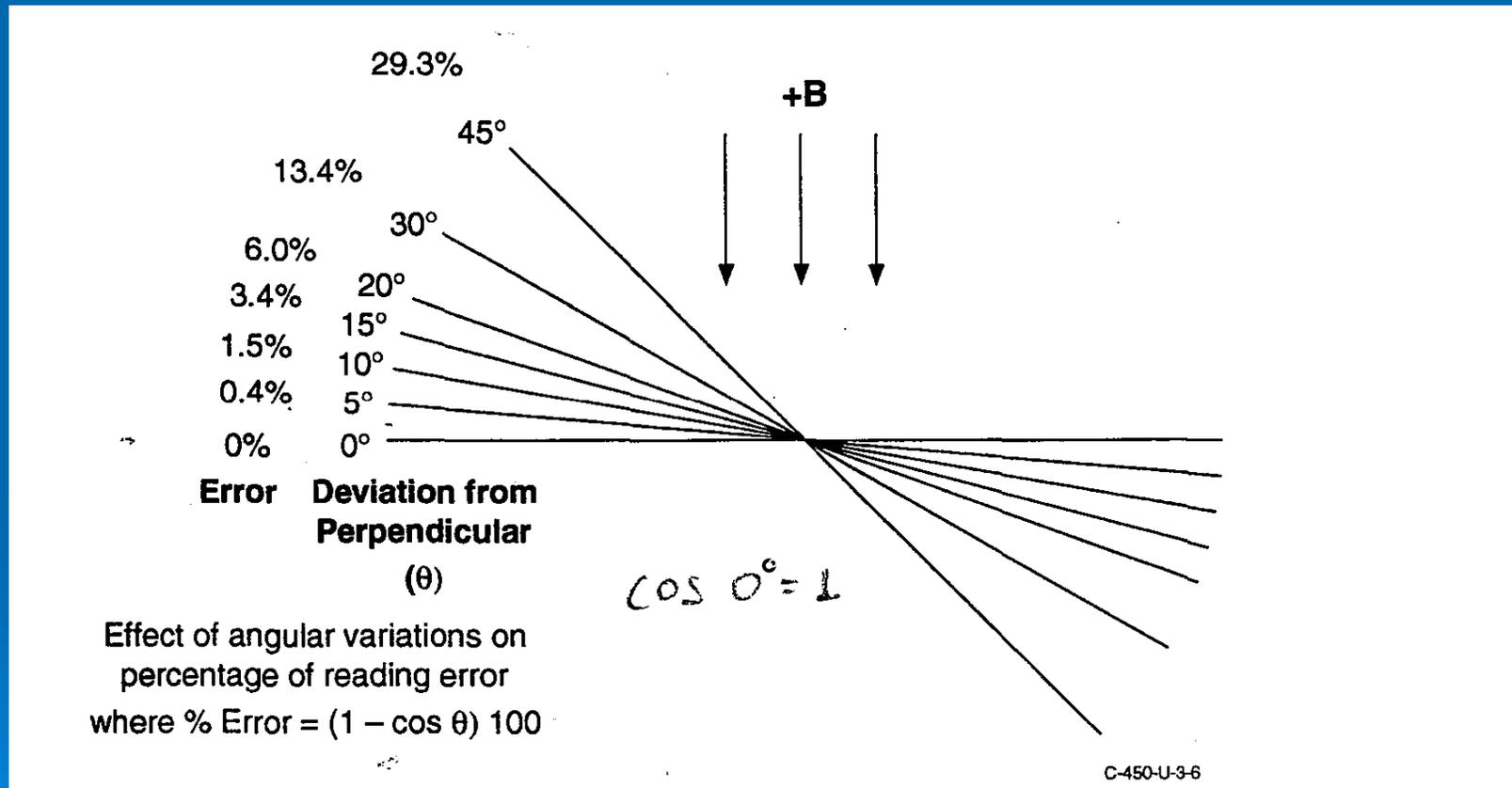
Principio del efecto Hall



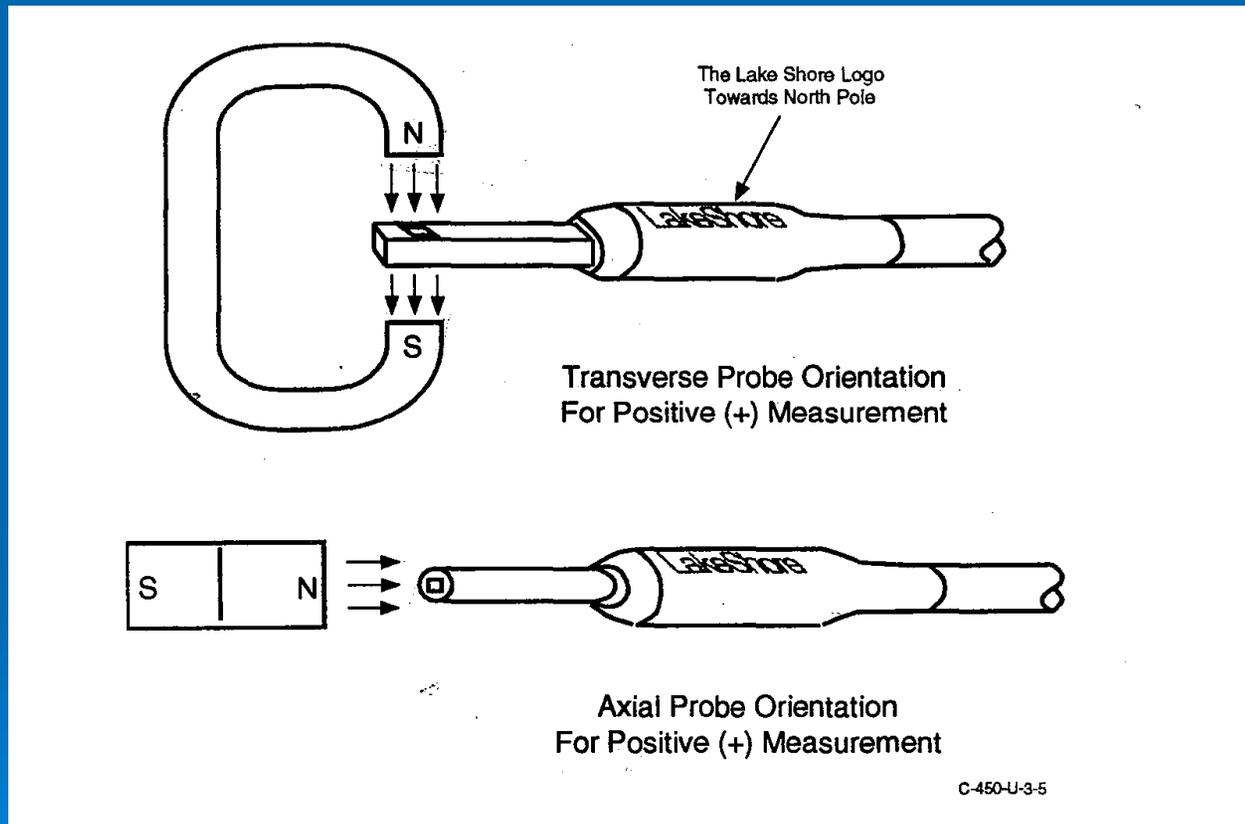
Principio de medición de la densidad de flujo magnético usando un sensor Hall



Importancia del posicionamiento del sensor Hall



Correcta colocación de la sonda y del sensor de medición respecto a la dirección de las líneas de flujo magnético



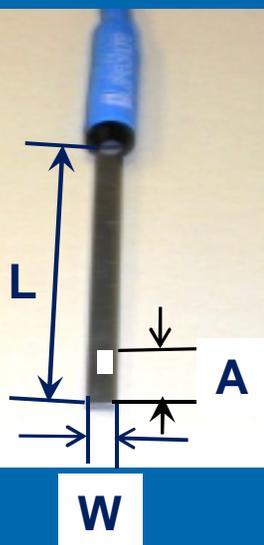
El magnetómetro de efecto Hall requiere de una “cámara de campo cero”, para cancelar el campo magnético B ambiental y ajustar el “cero” del instrumento. Se debe cuidar de no exponer la cámara de campo cero, a campos magnéticos intensos ya ésta puede llegar a magnetizarse.

Cámara de campo cero



Sondas Hall con sensor para medir flujo magnético transversal

$L = 101.6 \text{ mm}$
 $W = 4.6 \text{ mm}$
 $A = 3.81 \text{ mm}$



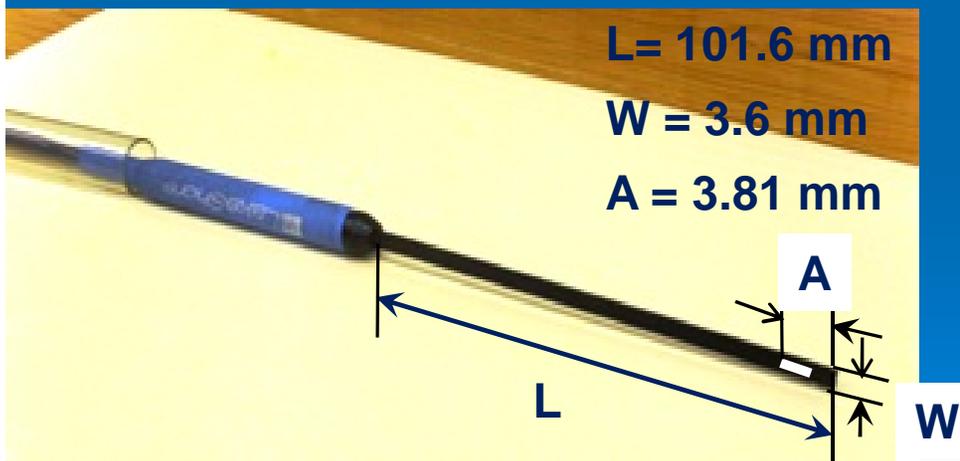
Material del vástago: Aluminio

Frecuencia de operación: Campos magnéticos continuos

Intervalo de medición: 30 mT a 3T

Temperatura de operación: 0°C a 75°C

$L = 101.6 \text{ mm}$
 $W = 3.6 \text{ mm}$
 $A = 3.81 \text{ mm}$



Material del vástago: Epoxi vidrio rígido

Frecuencia de operación: Campos magnéticos continuos y alternos de 10 Hz a 40 Hz

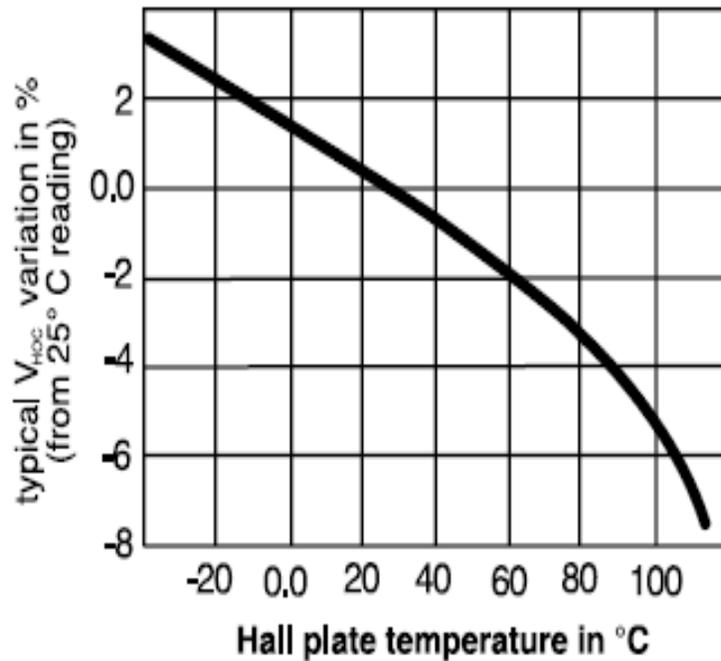
Intervalo de medición: 3 mT a 3T

Temperatura de operación: 0°C a 75°C

1. Temperatura

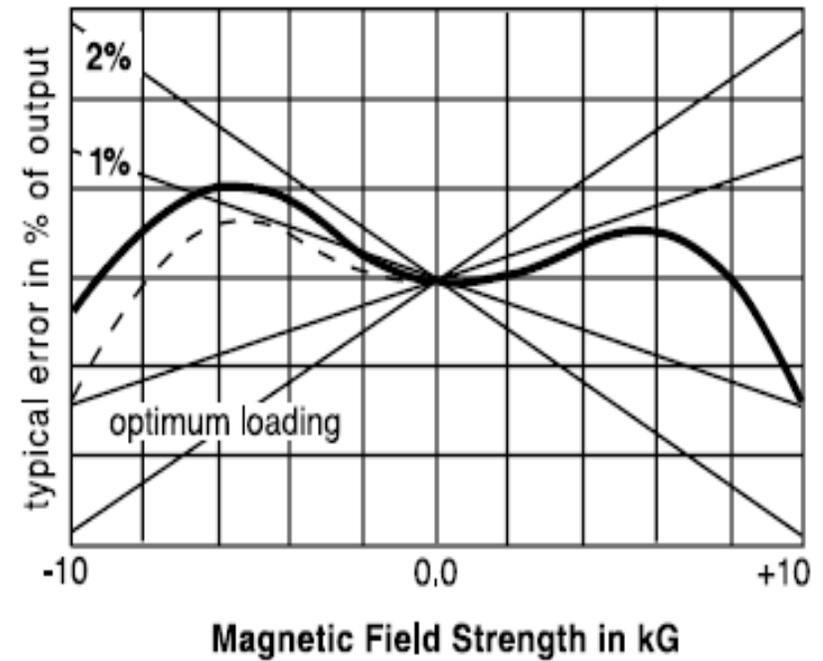
2. Linealidad

Temperature Influence



NOTE: For an unmounted Hall device supported by its leads, typical Hall plate temperature rise is 20° C for nominal control current.

Linearity



NOTE: The dotted line is a mirror image of the curve in the right hand plane and illustrates the reversibility error.

Magnetómetro tipo Fluxgate



Magnetómetro tipo Fluxgate

Características técnicas

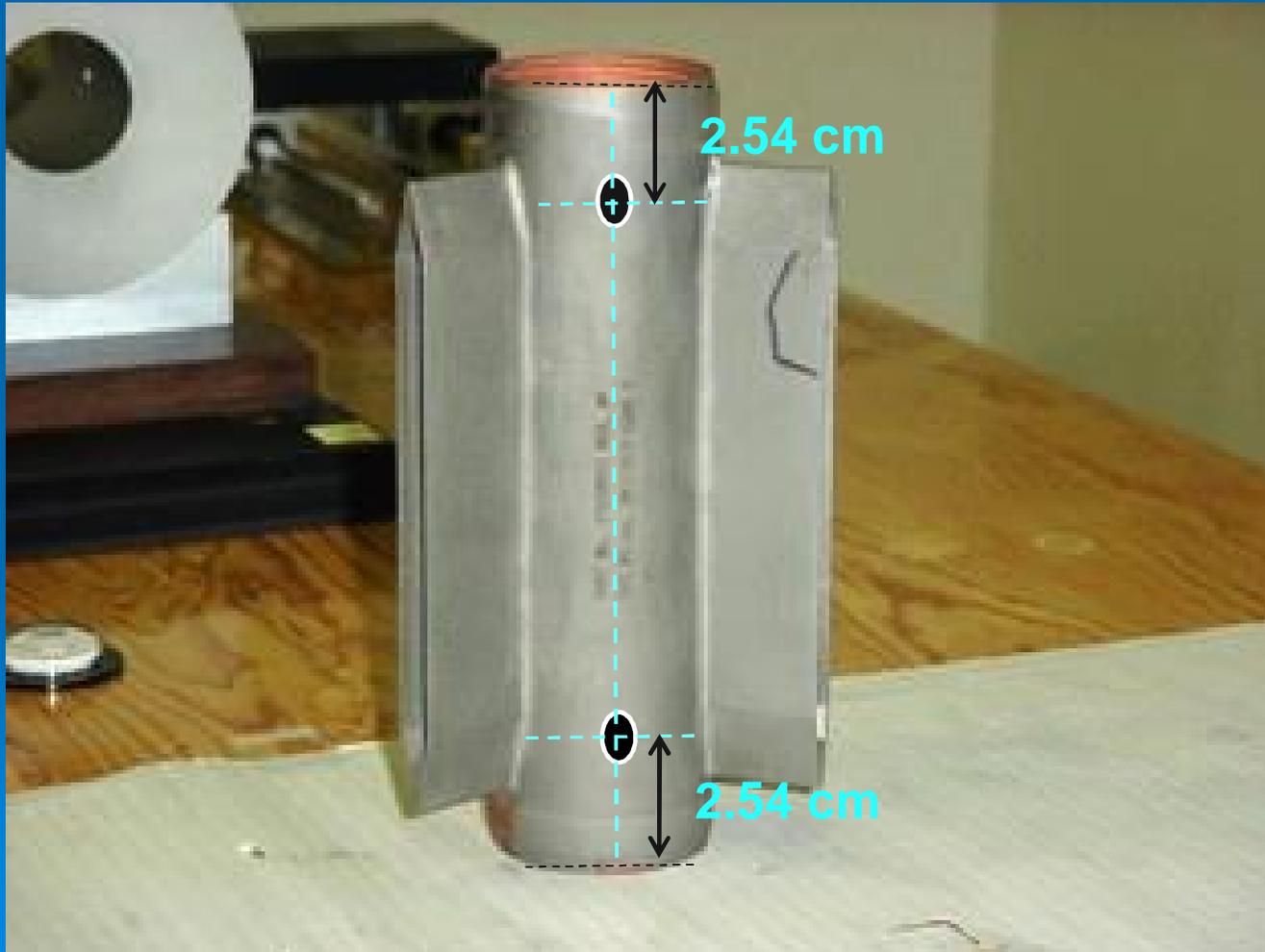
- a) Intervalo de medición de 0.1 nT a 2 mT
- b) Resolución de 0.1 nT
- c) Sensa la dirección de las líneas de flujo magnético
- d) Ancho de banda desde corriente continua hasta 10 Hz
- e) Posee sondas robustas y compactas para medir flujo axial y transversal
- f) Es portátil y cómodo para realizar mediciones en cualquier lugar
- g) Puede emplearse en un amplio intervalo de temperaturas (-10 a 50) °C.
- h) No posee mecanismo para compensar el campo magnético B ambiental, por lo que se requiere hacer correcciones al resultado final.



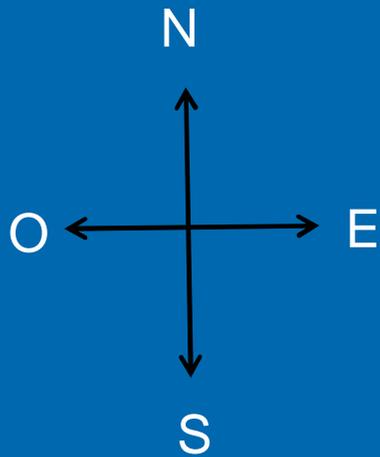
6. Consideraciones prácticas en las mediciones de magnetismo residual

- i. Magnetómetros utilizados, sus especificaciones y principios de medición.
- ii. Método de medición y cuidados que se requieren en la realización de las mediciones.

1.- Se deben identificar, en el material bajo medición, la posición de los puntos donde se realizarán las mediciones de magnetismo residual



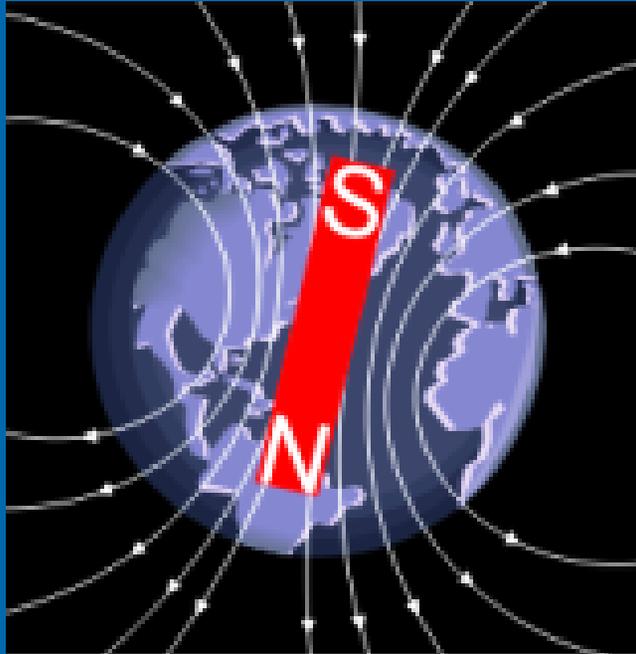
2.- Sin tener la presencia del material sujeto a medición, se orienta el sensor de medición para tener la menor influencia del campo magnético B ambiental, en las mediciones de magnetismo residual .



El campo magnético, B ambiental, se mide antes y después de realizar las mediciones de magnetismo residual .

$$B_{\text{ambiental}} = (B_{\text{ambiental antes}} + B_{\text{ambiental después}}) / 2$$

Campo magnético de la Tierra



Equipo de medición:

Magnetómetro de referencia
tipo Fluxgate

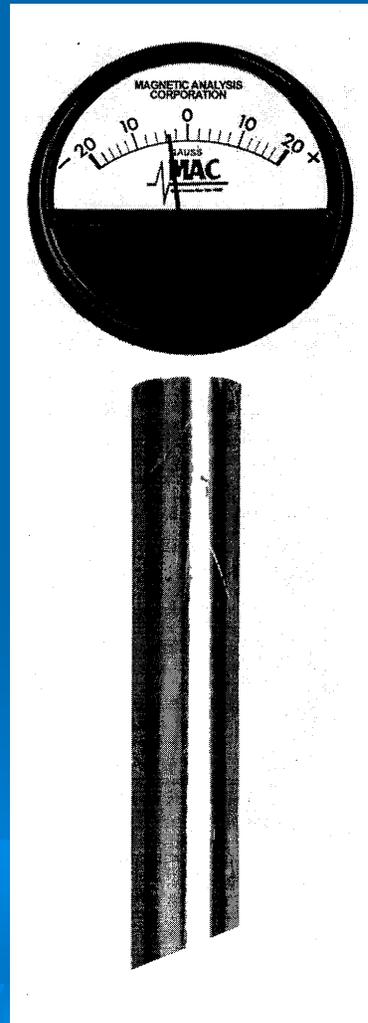


Para estas mediciones se coloca el sensor en la posición de interés, en la posición de referencia donde se midió el mínimo campo magnético ambiental (Dirección: este-oeste)

3.- La componente radial de magnetismo residual se mide posicionando la sonda de medición del magnetómetro, en contacto físico, con los puntos del material bajo medición donde se realizarán las mediciones de magnetismo residual. Para no perder la referencia del mínimo campo magnético ambiental, la sonda de medición se mantiene fija, con un soporte no magnético y el posicionamiento de los puntos de medición se realiza girando o moviendo la pieza o material a medir.



Medición de magnetismo residual usando un magnetómetro analógico



7. Prácticas de medición de magnetismo residual y análisis de las mediciones.

- i. Determinación de las principales fuentes de error y de incertidumbre en las mediciones
- ii. Trazabilidad de las mediciones



Práctica: Medición de magnetismo residual en una pieza de acero

Objetivo : Que el participante aprenda el procedimiento para realizar mediciones de magnetismo residual, identificando las principales fuentes de error y de incertidumbre que influyen en las mediciones.

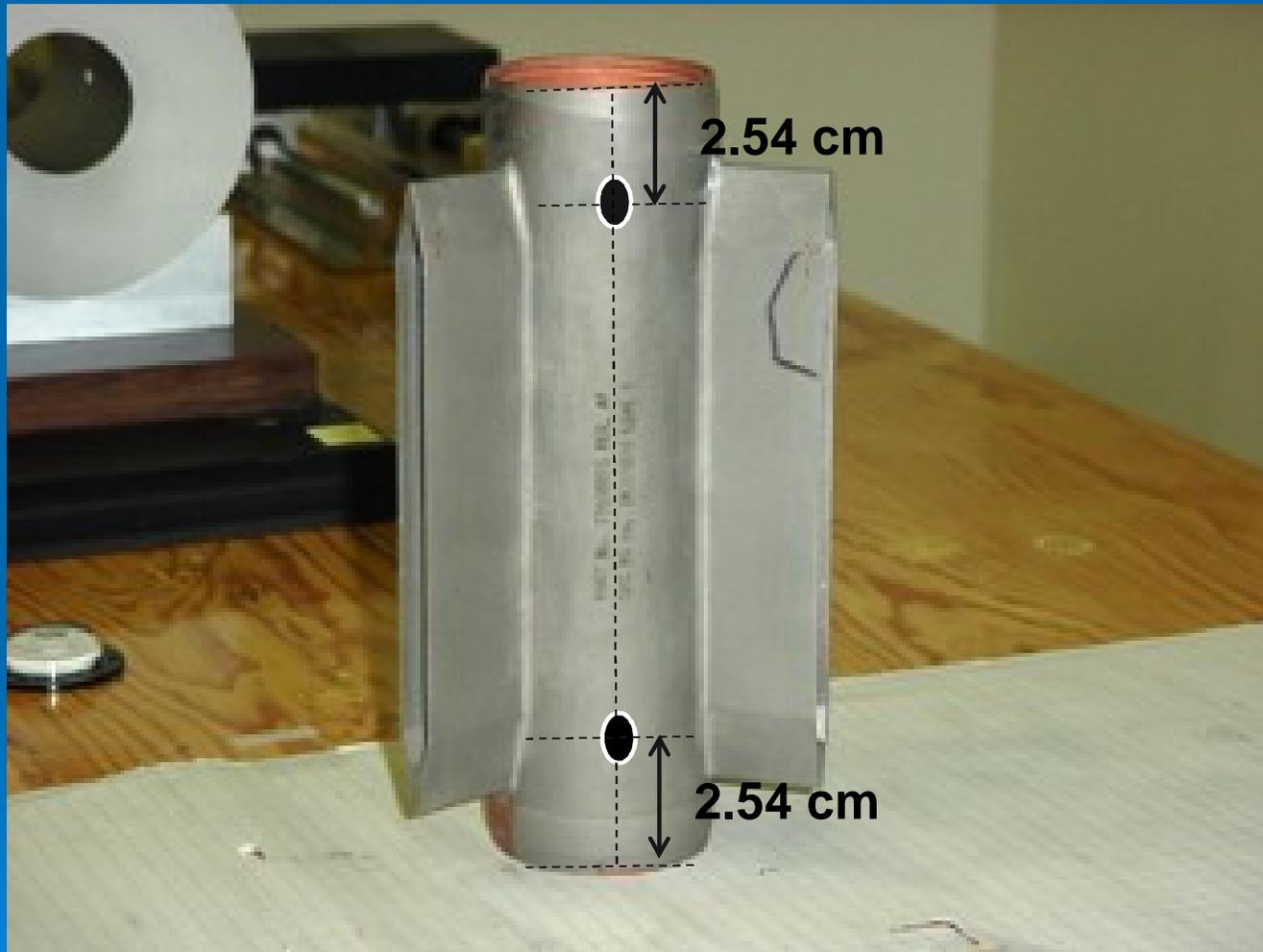
Equipo y material:

- 1 magnetómetro, con sensibilidad suficiente para medir campos magnéticos del orden de militeslas (mT) .
- Muestra o material de acero a medir

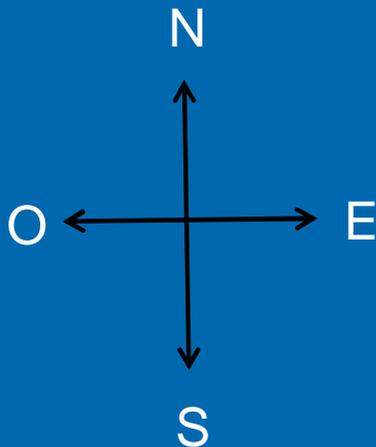
Desarrollo de la práctica :

1.- Se deben identificar con alguna marca, en el material bajo medición, la localización de los puntos donde se realizarán las mediciones de magnetismo residual. Es necesario determinar mediante coordenadas los puntos de medición y realizar una descripción lo más precisa posible de su ubicación, para determinar el mensurando.

Ejemplo de cómo identificar los puntos de medición



2.- Sin tener la presencia del material sujeto a medición y teniendo cuidado de no tener cerca del lugar de medición ningún objeto metálico que pueda afectar nuestras mediciones, se orienta el sensor de medición para tener la menor influencia del campo magnético B ambiental en las mediciones de magnetismo residual .



Se realizarán 6 mediciones de campo magnético, B ambiental, y se registran en la tabla que aparece a continuación, en la columna titulada

$B_{\text{ambiental antes}}$

Registro de mediciones

Lectura	$B_{\text{ambiental antes}}$ (μT)	$B_{\text{posición 1}}$ (μT)	$B_{\text{ambiental después}}$ (μT)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
Promedio			

3.-Teniendo el magnetómetro encendido y sin mover la sonda de medición, para no perder la referencia del mínimo campo magnético ambiental, se acerca la pieza o material sujeta a medición a la sonda del magnetómetro, la cual debe estar fija con ayuda de algún soporte de material no magnético. Se mide la componente radial de magnetismo residual posicionando la sonda de medición del magnetómetro, en contacto físico, con el punto del material bajo medición donde se realizarán las mediciones de magnetismo residual. Se realizan 6 mediciones de campo magnético B y se registran en la tabla, en la columna con título $B_{\text{posición 1}}$.



4.- Se retira la pieza o material sujeto a medición y se mide nuevamente el campo magnético ambiental. Se realizan 6 mediciones y se registran en la tabla, en la columna titulada $B_{\text{ambiental}}$ después.

Análisis de las mediciones, determinación del valor del campo magnético residual, identificación de las fuentes de error y de incertidumbre que afectan las mediciones

1) Determinar el mensurando, ¿Qué voy a medir?



2.- Hacer una lista de las posibles fuentes de error y de incertidumbre, que puedan influir en el mensurando

3.-Expresar mediante un modelo matemático al mensurando, el cual debe incluir las magnitudes de influencia

$$Y = f(X_1 + X_2 + \dots, X_N)$$



4.- Determinación del valor del mensurando

$B_{\text{posición 1}}$: _____ μT

$B_{\text{ambiental}}$: _____ μT ; $B_{\text{ambiental}} = (B_{\text{ambiental antes}} + B_{\text{ambiental después}}) / 2$

Fuentes de incertidumbre	Valor estimado
Dispersión de las mediciones de magnetismo residual ($B_{\text{posición1}}$)	
Resolución del magnetómetro ($B_{\text{posición1}}$)	
Error de medición del magnetómetro ($B_{\text{posición1}}$)	
Dispersión de las mediciones de magnetismo ambiental ($B_{\text{ambiental}}$)	
Resolución del magnetómetro ($B_{\text{ambiental}}$)	
Error de medición del magnetómetro ($B_{\text{ambiental}}$)	
<p>Campo magnético residual corregido:</p> <p>$B_{\text{residual corregido}} = B_{\text{posición 1}} - B_{\text{ambiental}}$</p>	

ii. Trazabilidad de las mediciones de magnetismo residual

La trazabilidad de las mediciones de magnetismo residual, a los valores de los patrones nacionales correspondientes, se asegura en primer lugar, calibrando el magnetómetro a utilizar y en segundo lugar, corrigiendo las mediciones realizadas con el magnetómetro, con el error de medición de éste, que es reportado en el certificado o informe de calibración.



NOTAS

Nota 1: Este trabajo ha sido desarrollado con recursos del gobierno federal de México. Sólo se permite su reproducción sin fines de lucro y haciendo referencia a la fuente.

Nota 2: En este documento pueden aparecer marcas comerciales únicamente con fines didácticos y a fin de lograr un entendimiento claro de las técnicas y procesos descritos . En ningún caso esta identificación implica recomendación o aval del CENAM o de alguna otra institución del gobierno federal de México, ni tampoco implica que los equipos o materiales identificados sean necesariamente los mejores para el propósito para el que son usados. El CENAM y las demás instituciones no tienen compromisos con ninguna marca comercial en particular.